

О Т З Ы В

Официального оппонента Волощенко А.М. на диссертацию Березнева В.П. «Разработка нейтронно-физического кода CORNER для анализа стационарных и нестационарных процессов в реакторах на быстрых нейтронах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Развитие ядерной энергетики и ядерной промышленности, и, в частности, ядерных реакторов на быстрых нейтронах, предполагает наличие возможности проведения надежных и достаточно оперативных расчетов поведения ядерно-энергетических объектов, в том числе, с точки зрения их ядерной безопасности, в различных ситуациях на основе решения уравнения переноса нейтронов с оценкой погрешности результатов. Традиционно, методы решения уравнения переноса излучения подразделяются на следующие группы: (1) метод Монте-Карло; (2) детерминистические методы: метод характеристик, S_N метод, метод поверхностных гармоник (МПГ) и др.; (3) инженерные методы, использующие приближение пространственной гомогенизации, диффузионный и (или) нодальный диффузионный методы.

Диссертация Березнева В.П. направлена на разработку программного средства, основанных на использовании S_N метода, предназначенного для анализа стационарных и нестационарных процессов в активной зоне реакторах на быстрых нейтронах с жидко-металлическим теплоносителем.

В.П. Березневым разработан и реализован в программе CORNER алгоритм расчета активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с жидко-металлическим теплоносителем, основанный на использовании в $hex-z$ геометрии алмазной (DD) схемы с коррекцией отрицательных потоков с применением DTV алгоритма. Для детального учета конструктивных особенностей исходной расчетной модели предусмотрено использование вложенных сеток из параллелепипедов с привлечением алмазоподобной DDL схемы для аппроксимации уравнения переноса в параллелепипедах. Для уменьшения погрешности аппроксимации уравнения переноса в $hex-z$ геометрии в программе CORNER реализована также нодальная схема. Для аппроксимации интеграла рассеяния на сфере в программе CORNER предусмотрено использование либо полностью симметричной S_N квадратуры Б. Карлсона порядка $N < 22$, либо квадратуры Гаусса-Чебышева типа произведение GT_N , которая точна для всех сферических гармоник $Y_l^m(\theta, \varphi)$ с $l \leq 2N - 1$.

В качестве начального приближения автором используется решение задачи в диффузионном приближении. Анизотропия рассеяния в программе CORNER учитывается в P_L приближении с $L \leq 5$. Все вычисления выполняются с использованием арифметики двойной точности. В программе реализован интерфейс со стандартными форматом представления групповых констант в формате ANISN, чем обеспечивается необходимое взаимодействие с программами подготовки групповых констант, например CONSYST, библиотеками сечений, включенными в систему SCALE и т. д. Кроме задачи решения стационарного уравнения переноса нейтронов в $hex-z$ геометрии, программа CORNER позволяет также

выполнять решение задач пространственной кинетики с использованием улучшенного квазистатистического метода с модифицированной методикой определения реактивности.

Для уменьшения расчетных времен в программе CORNER В.П. Березневым реализовано распараллеливание вычислений по угловым направлениям в группе с использованием интерфейса OpenMP. В качестве постпроцессора программа CORNER используется открытое программное обеспечение VisIt, предназначенное для анализа и обработки научных данных.

В диссертации Березнева В.П. приведены результаты верификационных расчетов, выполненных с использованием программы CORNER, для достаточно представительного набора бенчмарков, моделирующих активные зоны быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, в сопоставлении с результатами расчетов этих задач методом Монте-Карло и экспериментальными данными. Приведенные результаты демонстрируют эффективность реализованной нодальной методики, показывают возможности использования вложенных сеток для учета сложной гетерогенности задачи, демонстрирует возможности кода по учету пространственной гетерогенности по аксиальной переменной путем корректной гомогенизации задачи. Тестовый расчет нестационарной задачи в улучшенном квазистатистическом приближении свидетельствует о возможности применимости кода для анализа нестационарных процессов.

Практическая значимость и востребованность разработанного автором нейтронно-физического кода CORNER достаточно высоки. Код CORNER снабжен необходимым комплектом программной документации, входит в состав универсального расчетного кода нового поколения ЕВКЛИД/V1, представленного на аттестацию и используемого для проведения проектных расчетов РУ БРЕСТ-ОД-300 и РУ БН-1200, а также используется в качестве контрольно-реперного модуля для аттестованного программно-технического комплекса ГЕФЕСТ-800 расчетно-экспериментального сопровождения эксплуатации реактора БН-800 Белоярской АЭС.

В качестве замечаний можно отметить следующее. (1) Для коррекции отрицательных потоков в hex, z геометрии автором используется вариант Directional θ -WDD (DTW) схемы. Недостатком данного типа коррекции является использование взвешенной алмазной схемы в большом числе пространственных ячеек, что ведет за собой потерю второго порядка сходимости в интегральных величинах и не гарантирует монотонности разностного решения. Более удачным представляется использование AWDD схемы, поскольку она обеспечивает положительность и регулируемый уровень монотонности разностного решения, позволяет сохранить второй порядок сходимости интегральных величин. В AWDD схеме переход на взвешенную схему, как правило, происходит в небольшом количестве пространственных ячеек с большими градиентами разностного решения. Расчет остальных ячеек выполняется по алмазной схеме. (2) Предложенный автором вариант нодальной схемы для hex, z геометрии представляет алгоритмический интерес. Однако расчетные формулы данного алгоритма достаточно громоздки. Возможно, лучшего результата можно было бы добиться на пути обобщения нодальной Linear Discontinues (LD) схемы 3-его порядка точности на случай hex, z геометрии.

В целом, диссертационная работа В.П. Березнева является содержательным, оригинальным и законченным научным исследованием. В ней решена важная научно-техническая проблема: разработан нейтронно-физический код для кинетического расчета активной зоны РУ с жидко-металлическим теплоно-

сителем в стационарной и нестационарной постановках, обладающий необходимой точностью, быстродействием и сервисом для пре- и пост обработки, который внедрен в практику расчетов и представлен для аттестации в НТЦ ЯРБ при Ростехнадзоре в качестве компоненты универсального расчетного кода ЕВ-КЛИД/VI. Результаты, представленные в диссертации, прошли апробацию в печати и в докладах на международных и российских научных конференциях. В.П. Березнев известен научной общественности как высококвалифицированный специалист в области разработки кодов для проведения нейтронно-физических расчетов активной зоны быстрых РУ с жидкометаллическим теплоносителем. Данная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Зав. сектором, д. ф.-м. н.

А. М. Волощенко

Подпись А. М. Волощенко
заверяю

Ученый секретарь
Института прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН, к. ф.-м. н.



А. И. Маслов